



## بررسی تجربی تأثیر شکل دماغه پرتابه‌های استوانه‌ای، بر نفوذ سرعت بالا در کامپوزیت پلیمری با الیاف بافته شده

عرفان مهربانی یگانه<sup>۱</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>۲\*</sup>، محمدحسین پل<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

\* صندوق پستی ۱۴۱-۱۴۱۵، ghlia530@modares.ac.ir، تهران

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۹ مرداد ۱۳۹۳

پذیرش: ۲۸ شهریور ۱۳۹۳

ارائه در سایت: ۹۹ اردیبهشت ۹۹۹۹

کلید واژگان:

شکل دماغه پرتابه

نفوذ بالستیک

جذب انرژی

سرعت باقی مانده

کامپوزیت بافته شده

### چکیده

در این تحقیق، تأثیر شکل دماغه پرتابه‌های استوانه‌ای متقارن محوری و همچنین سرعت اولیه آن‌ها بر عملکرد بالستیک کامپوزیت چند لایه شیشه/ اپوکسی با الیاف بافته شده، به صورت تجربی، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. اثرات تغییر سرعت اولیه، تأثیر تغییر تیزی دماغه، تغییرات جذب انرژی، بررسی ناحیه لایه لایه شدگی و غیره، توسط شش پرتابه با شکل دماغه‌های تخت، مخروطی، نیم‌کروی و اجیوال، مورد بررسی قرار گرفته است. ماده مرکب با ۱۸ لایه الیاف شیشه بافته شده با کسر حجمی الیاف ۴۵ درصد و به روش لایه چینی دستی ساخته شده است. سیستم رزین نیز از اپیون ۸۲۸ به عنوان پایه اپوکسی و جفامین دی ۴۰۰ به عنوان سخت کننده ساخته شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهند که بیشترین اختلاف مابین عملکرد پرتابه‌ها با دماغه‌های مختلف در سرعت حد بالستیک مشاهده می‌شود. در این محدوده سرعت اولیه، بهترین عملکرد بالستیک را پرتابه اجیوال با شعاع کالیبر ۲/۵ و بدترین عملکرد بالستیک را پرتابه با دماغه تخت ارائه می‌کند. مساحت ناحیه لایه لایه شدگی هدف با افزایش تیزی دماغه و همچنین افزایش سرعت اولیه پرتابه، کاهش پیدا می‌کند. منحنی بالستیک پرتابه‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش سرعت اولیه پرتابه، اختلاف مابین سرعت باقی‌مانده پرتابه‌های مختلف کمتر می‌شود. به دلیل ایجاد گسیختگی برشی هدف در برخورد با پرتابه تخت، مقدار جذب انرژی هدف از این پرتابه، در سرعت‌های دورتر از سرعت حد بالستیک، کمتر از سایر پرتابه‌ها می‌شود.

## Experimental investigation of cylindrical projectiles nose shape effects on high velocity perforation of woven polymer composite

Erfan Mehrabani Yeganeh<sup>1</sup>, Gholam Hosein Liaghat<sup>2\*</sup>, Mohammad Hosein Pol<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

\* P.O.B. 14115-141 Tehran, Iran, ghlia530@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 10 August 2014  
Accepted 19 September 2014  
Available Online 99 May 9999

#### Keywords:

Projectile nose shape  
ballistic perforation  
energy absorption  
residual velocity  
woven composite

### ABSTRACT

In this study, experimental tests were performed to evaluate the effects of axisymmetric cylindrical projectile nose shapes and initial velocities on ballistic performance of laminated woven glass epoxy composites. Projectile initial velocity and nose sharpness changes, absorbed energy, delamination area, etc. are investigated by six blunt, hemispherical, conical and ogival projectiles. Hand lay-up method has been used to manufacture composite targets with 18 layers of 2D woven glass fibers of 45% fiber volume fraction. The epoxy system is made of epon 828 resin with jeffamine D400 as the curing agent. The results show that the maximum influence of projectile geometry on target behavior occurs in ballistic limit area. In this range of initial velocity, ogival (CRH=2.5) and blunt projectiles show the best and the worst ballistic performance. The delamination area decreases as the projectile nose sharpness increases or its initial velocity decreases. Ballistic curves for different projectiles show that the difference between projectiles behavior decreases in higher impact velocities. Because of target shear failure in blunt projectile impact, the amount of target absorbed energy for this projectile is less than other projectiles in higher impact velocities away from ballistic limit velocity.

### ۱- مقدمه

قلمرو خود، با خطرات موجود مقابله کند. از این رو همواره مراقبت از افراد و تجهیزات، از نگرانی‌های همیشگی بشر بوده و خواهد بود. پیشرفت روز افزون علوم مختلف، باعث پیشرفت‌های زیادی در زمینه طراحی سازه‌های مقاوم

از زمانی که انسان به اهمیت حفاظت از خود و آنچه که به آن وابسته است پی برد، همواره در تلاش برای پیدا کردن راهی بوده، تا با حفاظت از خود و

### Please cite this article using:

E. Mehrabani Yeganeh, Gh.H. Liaghat, M.H. Pol, Experimental investigation of cylindrical projectiles nose shape effects on high velocity perforation of woven polymer composite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 99, No. 9, pp. 9-99, 9999 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ون [۳] روابطی برای پیش‌بینی نفوذ پرتابه‌هایی با شکل دماغه مختلف در اهداف کامپوزیتی یکپارچه الیافی، ارائه نمود. این تحلیل بر پایه این فرض است که تغییر شکل‌ها متمرکز بوده و فشار متوسط ایجاد شده توسط هدف برای مقابله با پرتابه، به دو بخش تقسیم می‌شود. یک بخش فشار مقاوم چسبنده شبه استاتیک است که به صورت عمودی بر سطح پرتابه وارد و ناشی از تغییر شکل‌های الاستیک پلاستیک هدف است. بخش دیگر فشار مقاوم دینامیکی است که ناشی از تأثیرات سرعت است. بخش دوم توسط یک ضریب افزایشنده وابسته به سرعت، به جمله فشار استاتیکی اعمال می‌شود.

آلون و همکاران [۴] تأثیر شکل دماغه پرتابه حین نفوذ بالستیک در اهداف کامپوزیتی کربن/اپوکسی ساخته شده به روش VARTM<sup>۱</sup> را مورد بررسی قرار دادند. اهداف با دو ضخامت ۳/۲ و ۶/۵ میلی‌متر، به شکل مربع، با ابعاد ۴ اینچ ساخته و چهار پرتابه مختلف با دماغه‌های تخت، مخروطی، نیم‌کروی و مخروطی ناقص، استفاده شدند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشترین مقدار جذب انرژی را پرتابه سر مخروطی و سپس به ترتیب پرتابه‌های سرتخت، سر نیم‌کروی و سر مخروطی ناقص دارند. پرتابه سر مخروطی ناقص با سرعت کمتری نفوذ می‌کند، زیرا در ابتدا یک منطقه برشی کوچک ایجاد می‌کند که سپس توسط توسعه حفره الاستیک پلاستیک<sup>۲</sup> ادامه می‌یابد. پرتابه سرتخت نیز ناحیه برشی ایجاد می‌کند اما انرژی جذب شده به خاطر بزرگ بودن سطح ضربه، بیشتر است. در این حالت جدا شدگی پلاگ دایره‌ای رخ می‌دهد. گسیختگی در اهدافی که مورد اصابت پرتابه سر مخروطی و سر نیم‌کروی قرار گرفتند، توسعه حفره الاستیک پلاستیک است. در این حالت الیاف تمایل دارند که حین نفوذ، پخش و کشیده شوند.

میتروسکی و همکاران [۵] تأثیر شکل دماغه ضربه‌زننده بر واکنش ورق‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی نازک را توسط دستگاه سقوط وزنه مورد آزمایش قرار دادند. ضربه‌زننده‌هایی با سه دماغه مخروطی، اجیوال و نیم‌کروی استفاده شدند. مشخص گردید که در سرعت‌های پایین، برخلاف سرعت‌های بالا، واکنش هدف سراسری است. انرژی جذب شده توسط نمونه، هنگامی که ضربه‌زننده سر مخروطی استفاده گردید، بیشترین مقدار بوده و بیشترین عمق نفوذ در این حالت روی می‌دهد. در ضربه‌زننده سر نیم‌کروی، نیروی تماس، بیش‌ترین مقدار و همچنین مدت زمان تماس، کمترین مقدار را نسبت به ضربه‌زننده‌های دیگر داشت. در پرتابه سر مخروطی به دلیل بیشتر بودن زمان تماس بین هدف و ضربه‌زننده، رأس نمودار نیرو-زمان نسبت به حالت‌های دیگر پایین‌تر است. میتروسکی و همکاران در تحقیق دیگری [۶] همین آزمایش‌ها را بر روی ورق‌های کامپوزیتی پلی‌استر تقویت شده با الیاف شیشه انجام دادند، با این تفاوت که اهداف تحت پیش‌بار قرار گرفته بودند. تغییر خاصی در نتایج مشاهده نشد. تنها تأثیر برجسته، افزایش عمق نفوذ ضربه‌زننده سر مخروطی بود.

نایب و همکاران [۷] بر پایه تئوری انتشار موج، به بررسی تحلیلی ضربه بالستیک پرتابه بر اهداف کامپوزیتی با الیاف بافته شده پرداختند. آن‌ها در این روش، مکانیزم‌های مختلف جذب انرژی و خرابی هدف را بررسی و روابط تحلیلی برای هریک از مکانیزم‌های شکست ارائه نمودند. در این روش فرآیند نفوذ به بازه‌های زمانی کوچک تقسیم و انرژی جذب شده در هر مرحله محاسبه می‌شود.

هی و همکاران [۸] نفوذ پرتابه‌های با دماغه متفاوت را در برخورد با اهداف کامپوزیتی، به روش المان محدود، شبیه‌سازی کردند. آن‌ها فرض

گشته است. اهمیت بالای این موضوع باعث گردیده است که محققین، همواره، به دنبال یافتن راهی برای افزایش ایمنی افراد، سازه‌ها و تجهیزات، در برابر خطرات مختلف، مانند آسیب‌های ناشی از ضربه باشند.

یکی از موضوعات مهم در مهندسی مکانیک، تحلیل رفتار اجسام و سازه‌ها، در مواجهه با ضربه یک شیء دیگر است. در شرایط یکسان ضربه، شکل هندسی جسم ضربه‌زننده و نوع شکل تماسی که مابین دو جسم ایجاد می‌شود، تأثیر بسیار زیادی بر رفتار و خرابی جسمی که تحت ضربه قرار می‌گیرد، دارد. لذا شکل ضربه‌زننده، موضوع تحقیقی بسیار مهمی برای مطالعه و بررسی می‌باشد. بررسی ضربه‌های ناشی از قطعات جدا شده از موتورها، پره‌های کنده شده از توربین‌ها، ضربات ناشی از برخورد اجرام آسمانی با فضاپیماها، برخورد یا سقوط ابزار بر سازه‌ها، ضربه ایجاد شده توسط ترکش‌های ناشی از انفجار یا گلوله‌ها و موارد بسیار دیگری از این قبیل، مستلزم آشنایی با نحوه رفتار ضربه‌زننده با شکل دماغه‌های مختلف است.

سازه‌هایی که در مواجهه با برخورد یا ضربه هستند، معمولاً از جنس فلز یا کامپوزیت می‌باشند. امروزه در بسیاری از کاربردهای مهندسی با فناوری پیشرفته، کامپوزیت‌ها می‌توانند ماده انتخابی باشند. مزایای خاص کامپوزیت‌ها در مقایسه با فلزات، نظیر استحکام و سفتی ویژه (نسبت سفتی ماده به چگالی آن) بالا، مقاومت خستگی، مقاومت خوردگی و همچنین خواص ضربه‌ای ویژه بالا، آنها را برای استفاده در بسیاری از اجزای سازه‌های خودروها، هواپیماها و کشتی‌ها مورد توجه فراوان قرار داده است. از طرفی، در بارگذاری با نرخ کرنش زیاد، اولویت انتخاب با مواد کامپوزیتی است.

تحقیقات انجام شده در زمینه مقاوم‌سازی سازه‌های کامپوزیتی در برابر ضربه پرتابه‌ها، منجر به پیشرفت‌های بسیاری شده است. از جمله این موارد که مورد علاقه محققان بسیاری بوده است، بررسی رفتار پرتابه‌ها با شکل دماغه‌های مختلف، در فرآیند برخورد و نفوذ به اجسام کامپوزیتی است. بررسی تأثیر شکل هندسی دماغه پرتابه، ابتدا به صورت تجربی و با همانندسازی برخورد پرتابه با هدف، در آزمایشگاه صورت می‌پذیرد. چندی از محققان علوم مهندسی، مطالعات خود را در این زمینه متمرکز ساخته‌اند.

ایرمانگر و ونت [۱] با هدف بررسی تأثیر ترکش بر روی زره‌ها، ضربه پرتابه‌های تکه‌ای<sup>۱</sup> بر اهداف کامپوزیتی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها پرتابه فولادی با دماغه قلم مانند<sup>۲</sup> و اهداف کامپوزیتی دارای الیاف نایلون<sup>۳</sup> و ماتریس EVA<sup>۴</sup> را استفاده کردند. نشان داده شد که فرآیند نفوذ در این آزمایش دارای دو مرحله اصلی است: (۱) بعد از ضربه، پلاگ برشی توسط قسمت قائمه دماغه پرتابه بریده می‌شود. بخش مورب دماغه باعث ایجاد گسیختگی کششی در الیاف می‌شود. (۲) لایه لایه شدگی<sup>۵</sup> مابین لایه‌های الیاف در پشت هدف، بر اثر کشش رخ می‌دهد.

ماینز و همکاران [۲] تأثیر ضربه سرعت بالای سه پرتابه با دماغه‌های مختلف را بر کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه بررسی و انرژی مورد نیاز برای نفوذ این پرتابه‌ها را مورد مقایسه قرار دادند. پرتابه‌ها با شکل دماغه‌های تخت، نیم‌کروی و مخروطی بودند. نتایج آن‌ها نشان داد که پرتابه تخت بیشترین ضریب تشدید دینامیکی<sup>۶</sup> را ارائه می‌کند، در حالیکه این ضریب برای دو پرتابه دیگر کمترین مقدار را دارد.

- 1- Fragment simulating projectiles
- 2- Chisel nosed steel projectile
- 3- Nylon fibers
- 4- Ethylene vinyl acetate
- 5- Delamination
- 6- Dynamic enhancement factor

7- Vacuum assisted resin transfer molding

8- Elastic-plastic hole enlargement

ب) یک پلی‌اکسیپروپیلن دی‌امین با وزن مولکولی  $400 \text{ gr/mol}$  و با نام تجاری جف‌امین دی  $400$ ، ساخته شده توسط شرکت هانسن، به عنوان سخت کننده، تشکیل شده است.

برای ساخت پرتابه‌ها از فولاد ابزار سردکار با شماره استاندارد  $2210$  معروف به فولاد نقره‌ای، با قطر  $10$  میلی‌متر استفاده شده است.

## ۲-۲- ساخت هدف کامپوزیتی

ورق‌های کامپوزیتی با  $18$  لایه الیاف شیشه بافته شده با درصد حجمی الیاف  $45$  درصد و به روش لایه چینی دستی تولید می‌شوند. جزء ماتریس از دو بخش رزین و سخت کننده تشکیل شده که نسبت اختلاط جزء سخت کننده به پایه پلیمر، طبق پیشنهاد شرکت سازنده،  $55:100$  است. پس از لایه چینی، ورق کامپوزیتی تحت فرآیند پخت قرار می‌گیرد. پخت ماده مرکب به مدت  $150$  دقیقه در دمای  $80^\circ\text{C}$  و فشار  $2/5 \text{ bar}$  و سپس  $150$  دقیقه دیگر در دمای  $120^\circ\text{C}$  و فشار  $1/5 \text{ bar}$ ، در اتوکلاو انجام می‌شود. در نهایت بعد از پخت، نمونه‌ها در اندازه  $12 \times 12 \text{ cm}^2$ ، برای قرارگیری در فیکسچر، بریده می‌شوند. ضخامت نهایی محصول کامپوزیتی،  $4/2$  میلی‌متر است.

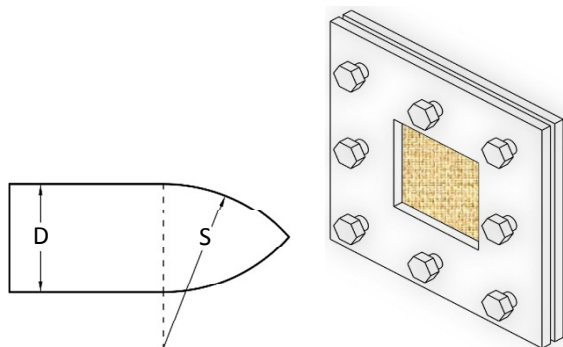
## ۲-۳- ساخت فیکسچر

همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، فیکسچر به شکل مربعی و دارای ابعاد داخلی  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  ساخته می‌شود. فیکسچر با هشت پیچ در طرفین، کاملاً سفت می‌شود تا شرایط مرزی گیردار در مرزهای ورق ایجاد گردد.

## ۲-۴- ساخت پرتابه‌ها

در این تحقیق، به منظور بررسی شکل دماغه پرتابه، مجموعاً شش عدد پرتابه متقارن محوری با شکل دماغه‌های مختلف و با قطر  $10 \text{ mm}$  ساخته شد. پرتابه‌ها همگی دارای جنس یکسان بوده و به گونه‌ای ساخته شده‌اند که دارای حجم مساوی باشند. در نتیجه وزن پرتابه‌های مختلف با هم مساوی و برابر  $9/3$  گرم است.

پرتابه‌های مورد استفاده در این تحقیق دارای دماغه‌های تخت، نیم‌کروی، مخروطی با زاویه دماغه  $37^\circ$ ، مخروطی با زاویه دماغه  $90^\circ$ ، اجیوال با شعاع کالیبر  $2/5$  و اجیوال با شعاع کالیبر  $1/5$  می‌باشد. مطابق شکل ۲، شعاع کالیبر دماغه با رابطه  $CRH=S/D$  تعریف می‌شود که  $S$  شعاع دماغه و  $D$  قطر پرتابه است. این نسبت برای دماغه تخت، صفر و برای دماغه نیم‌کروی،  $0/5$  می‌باشد. پرتابه‌های ساخته شده و همچنین نقشه پرتابه‌ها با دماغه‌های مختلف که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در شکل ۳ مشخص است.



شکل ۲ پارامترهای پرتابه اجیوال برای تعیین شعاع کالیبر دماغه

شکل ۱ فیکسچر مورد استفاده

کردند که پاسخ هدف می‌تواند با یک تابع نیرویی وابسته به سرعت بیان شود. سپس این تابع را به عنوان شرط مرزی به سطح پرتابه اعمال کردند. با استفاده از این روش تحلیلی عددی، سرعت باقی‌مانده پرتابه محاسبه شد.

پل و همکاران [۹] فرآیند نفوذ پرتابه‌های سرتخت را در مواد مرکب شیشه/اپوکسی، مورد تحلیل قرار دادند. آن‌ها مدت زمان نفوذ را به جزءهای کوچک تقسیم کردند و مولفه‌های اصلی جذب انرژی مانند انرژی جنبشی مخروط ایجاد شده در پشت هدف، انرژی تغییر شکل الیاف ثانویه، انرژی کشش و یا شکست کششی الیاف اولیه، انرژی لایه لایه‌ای شدن ماده مرکب و انرژی ترک خوردگی ماتریس را در نظر گرفتند.

خدادادی و همکاران [۱۰] عوامل موثر بر عملکرد بالستیک پارچه‌های کولار، شامل خواص هدف و هندسه پرتابه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها آزمایش‌های بالستیک را توسط دو پرتابه سرتخت و سرکروی انجام داده و نشان دادند که لبه‌های تیز پرتابه سرتخت باعث می‌شود الیاف پارچه علاوه بر تنش کششی، تحت تنش برشی نیز قرار بگیرند. تنش ایجاد شده در الیاف توسط پرتابه سرکروی، از نوع تنش کششی است. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که پرتابه سرتخت به دلیل اعمال تنش برشی ناشی از لبه پرتابه، دارای حد بالستیک کمتری است.

ایکتن و همکاران [۱۱] تأثیر تغییر شعاع ضربه‌زننده‌های نیم‌کروی در برخورد با اهداف کامپوزیتی شیشه/اپوکسی را مورد مطالعه قرار دادند. بعد از انجام آزمایش برخورد سرعت پایین بر روی نمونه‌ها، محقق استحکام فشاری نمونه‌ها را بررسی نمود. مشاهده شد که در انرژی ضربه یکسان، حداکثر نیروی تماسی و همچنین بیشترین بار آستانه خرابی در ضربه‌زننده با شعاع بیشتر رخ می‌دهد. در تمامی موارد، استحکام فشاری بعد از ضربه  $1$ ، با افزایش انرژی ضربه، کاهش و با افزایش قطر ضربه‌زننده، افزایش یافت.

جردن و نایتو [۱۲] به مطالعه نفوذ بالستیک پرتابه‌ها با دماغه‌های تکه‌ای در اهداف کامپوزیتی شیشه/فولیک پرداختند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که پرتابه‌های با دماغه کندتر، عملکرد بالستیک ضعیف‌تری ارائه می‌کنند. آن‌ها نتایج تجربی خود را با مدل تحلیلی ون [۳] مورد مقایسه قرار دادند که تطابق خوبی مابین نتایج مشاهده شد.

در این تحقیق، تأثیر شکل دماغه و همچنین سرعت اولیه پرتابه‌های متقارن محوری بر عملکرد بالستیک اهداف کامپوزیتی، به صورت تجربی، مورد مطالعه قرار گرفت. هدف این تحقیق بررسی تأثیر طول، تیزی و هندسه دماغه بر روی خصوصیات چگونگی سرعت حد بالستیک، میزان جذب انرژی هدف، ناحیه لایه لایه شدگی و ... با تعداد بیشتری از شکل دماغه‌ها بوده است. برای این منظور اهداف کامپوزیتی تحت ضربه سرعت بالای شش پرتابه متقارن محوری با شکل دماغه‌های تخت، نیم‌کروی، مخروطی و اجیوال قرار گرفت.

## ۲- روش ساخت و مواد اولیه

### ۲-۱- مواد اولیه

هدف استفاده شده در این تحقیق، یک ماده مرکب پایه پلیمری چند لایه است. برای ساخت ماده مرکب مذکور از الیاف شیشه نوع E دارای بافت دوبعدی و خواص طولی و عرضی مساوی، استفاده شده است. این الیاف دارای چگالی سطحی  $200 \text{ gr/m}^2$  و چگالی حجمی  $2400 \text{ kg/m}^3$  است. رزین پلیمری از دو بخش الف) یک دیکلیسیدیل‌تر بیسفنول نوع آ (DGEBA) با نام تجاری ایپون ۸۲۸، تولید شده توسط شرکت شل، به عنوان پایه اپوکسی و

2- Ogival  
3- Caliber radius head (CRH)

1- Compression after impact (CAI) strength

با داشتن جرم و چگالی الیاف، رزین و کامپوزیت ساخته شده، درصد حجمی الیاف به میزان ۴۴/۸٪ محاسبه می‌شود.

### ۳-۱-۲- آزمایش کشش در جهت الیاف

ابعاد نمونه‌ها و نحوه انجام آزمایش کشش توسط استاندارد ASTM-D3039 تعیین می‌گردد. تعداد ۵ نمونه با ابعاد ۲۵×۲/۵ میلی‌متر به منظور تکرار و اطمینان از نتیجه آزمایش ساخته و مورد آزمایش قرار داده شد. به منظور کاهش اثر تمرکز تنش در دو انتهای قطعه و حصول شکست استاندارد، از تب<sup>۱</sup> کامپوزیتی با الیاف دارای جهت‌گیری ۴۵°، به ابعاد ۵×۲/۵ میلی‌متر و زاویه انتهایی حدود ۸ درجه استفاده شد. نهایتاً بعد از اتصال تب‌ها، با استفاده از چسب مناسب (چسب CA<sup>۲</sup>)، نمونه‌های نهایی تحت بارگذاری با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند تا شکست کامل رخ دهد. نیروی وارد بر نمونه توسط لودسل<sup>۳</sup> و کرنش قطعه توسط اکستنسومتر<sup>۴</sup> اندازه‌گیری شدند.

### ۳-۱-۳- آزمایش برش

آزمایش برش طبق استاندارد ASTM-D3518 انجام می‌شود. در این حالت ۵ عدد نمونه استاندارد با جهت‌گیری الیاف ۴۵° ساخته و تحت کشش با نرخ بارگذاری ۲ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند. ابعاد و هندسه نمونه‌ها همانند آزمایش کشش در جهت الیاف است.

### ۳-۲- آزمایش بالستیک

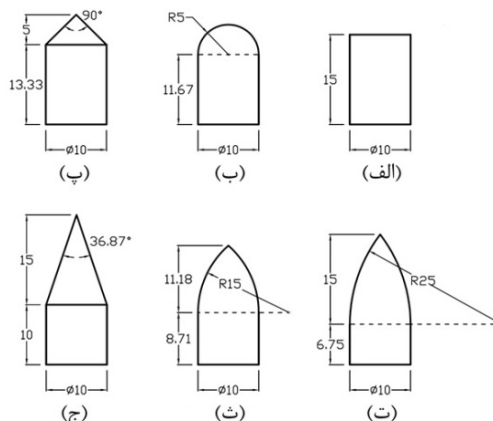
ورق‌های چندلایه کامپوزیتی تولید شده، توسط دستگاه تفنگ گازی موجود در دانشگاه تربیت مدرس (شکل ۴)، تحت ضربه سرعت بالای پرتابه قرار گرفتند. سرعت اولیه پرتابه توسط فشار گاز مخزن ایجاد می‌شود. سرعت پرتابه، قبل از برخورد با هدف توسط سرعت سنج لیزری محاسبه می‌گردد. بعد از برخورد پرتابه به هدف و در صورت عبور از آن، سرعت خروجی پرتابه، به دلیل امکان انحراف پرتابه، توسط دوربین لیزر (هرکدام دارای ۴۰ لیزر افقی و ۴۰ لیزر عمودی) که با فاصله از هم قرار دارند، اندازه‌گیری می‌شود. هر یک از پرتابه‌های مذکور با سرعت‌های مختلف (بالتر از حد بالستیک) به سمت هدف شلیک شدند تا علاوه بر بررسی تأثیر شکل دماغه پرتابه، امکان بررسی تغییر عملکرد هر یک از پرتابه‌ها با تغییر سرعت به وجود آید. سرعت برخورد ابتدایی بالاتر از حد بالستیک هدف انتخاب می‌شود. سایر سرعت‌ها با توجه به نتیجه آزمایش اول، به گونه‌ای تعیین می‌گردند تا سرعت حد بالستیک هدف در هر یک از شکل دماغه‌ها بدست آید.

### ۴- نتایج و بحث

بعد از انجام آزمایش کشش، نمودار تنش-کرنش ماده مرکب به صورت شکل ۵ حاصل می‌شود.

مقدار	خاصیت مکانیکی
۲۸/۶ GPa	مدول الاستیک در جهت الیاف
۲۳۷/۰ MPa	استحکام کششی
۰/۷ درصد	کرنش شکست
۵/۱ GPa	مدول برشی در صفحه
۴۲/۹ MPa	استحکام برشی

1- Tab  
2- CyanoAcrylate  
3- Load cell  
4- Extensometer



شکل ۳ پرتابه‌های ساخته شده و نقشه آن‌ها، الف) پرتابه تخت، ب) پرتابه نیم‌کروی، پ) پرتابه مخروطی ۹۰°، ت) پرتابه اجیوال (CRH=۲/۵، CRH=۱/۵) و ج) پرتابه مخروطی ۳۷° (ابعاد به میلی‌متر است)



شکل ۴ دستگاه تفنگ گازی

جدول ۱ چگالی الیاف، رزین و محصول کامپوزیتی

ماده	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
الیاف شیشه	۱۷۰۱
رزین	۱۱۳۶
کامپوزیت شیشه/اپوکسی	۲۴۰۳

### ۳- انجام آزمایش‌ها

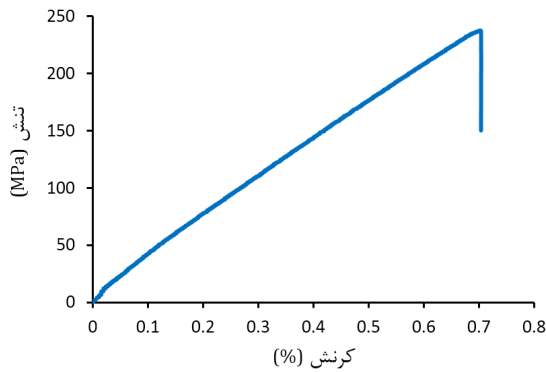
#### ۳-۱-۱- آزمایش‌های تعیین خواص مکانیکی ماده

##### ۳-۱-۱-۱- درصد حجمی الیاف

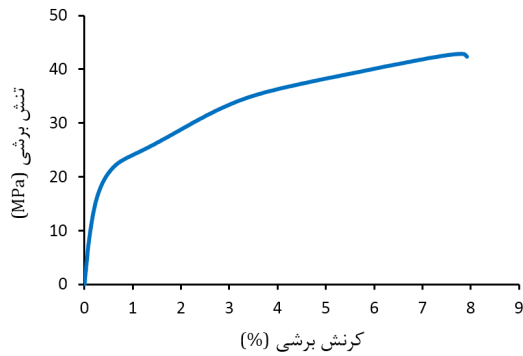
برای تعیین درصد حجمی الیاف در محصول کامپوزیتی، جرم الیاف و ماتریس در محصول نهایی و همچنین چگالی الیاف و ماتریس استفاده شده باید مشخص باشد.

به منظور تعیین جرم الیاف و ماتریس، تعداد چهار نمونه از محصول نهایی جدا و بر مبنای استاندارد ASTM-D2734، به مدت ۵ ساعت توسط شعله مستقیم سوزانده می‌شوند تا رزین موجود در کامپوزیت کاملاً خارج گردد. بعد از سوختن کامل نمونه‌ها وزن الیاف باقی‌مانده تعیین می‌شود.

چگالی الیاف، رزین و محصول کامپوزیتی طبق استاندارد ASTM-D3800 تعیین می‌شود. بدین منظور با اندازه‌گیری جرم قطعه در هوا و همچنین هنگام غوطه‌وری درون سیال، چگالی نمونه محاسبه می‌گردد. مقادیر بدست آمده برای چگالی الیاف، رزین و کامپوزیت، طبق جدول ۱ ارائه می‌شود.



شکل ۵ نمودار تنش-کرنش ماده مرکب



شکل ۶ نمودار تنش-کرنش برشی ماده مرکب

در مجموع بیش از ۴۵ آزمایش بالستیک با پرتابه‌های مختلف انجام شد. نتایج آزمایش‌های ضربه، سرعت اولیه، سرعت باقی‌مانده و همچنین انرژی جذب شده، در جدول ۳ ارائه شده است.

نتایج آزمایش‌ها به صورت منحنی بالستیک، یعنی منحنی سرعت باقی‌مانده برحسب سرعت اولیه برای پرتابه با دماغه‌های مختلف ارائه می‌گردد. این نمودار با یک مدل تحلیلی که اولین بار توسط رکت و ایپسون معرفی شده، تقریب زده می‌شود [۱۳]. این مدل تحلیلی به صورت رابطه ۱ ارائه شده است.

$$v_r = a \left( v_i^p - v_{bl}^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (1)$$

که در رابطه ۱،  $v_r$  سرعت باقی‌مانده،  $v_i$  سرعت اولیه،  $v_{bl}$  سرعت حد بالستیک و  $a$  و  $p$  ضرایبی هستند که با توجه به رفتار پرتابه مورد نظر تعیین می‌گردند تا بهترین برازش برای نقاط نمودار ایجاد شود. سرعت حد بالستیک، ضرایب رابطه برازش شده و دقت آن، که برای شکل دماغه‌های مختلف تعیین شده، در جدول ۴ ارائه شده است.

#### ۴-۱- پرتابه با دماغه تخت

منحنی سرعت باقی‌مانده برحسب سرعت اولیه برای پرتابه با شکل دماغه تخت در شکل ۷ مشخص است. در این حالت مکانیزم گسیختگی هدف به صورت ترکیبی از پلاگ<sup>۱</sup> برشی لایه‌های رویی و پتال<sup>۲</sup> لایه‌های پشتی، مشاهده می‌شود. در گسیختگی پلاگینگ یک نوار با کرنش برشی بالا، با شعاعی نزدیک شعاع پرتابه ایجاد و از هدف جدا می‌شود. گسیختگی پتالینگ حالتی است که ترک‌های شعاعی و چرخش متعاقب ماده هدف به وجود می‌آید. مکانیزم گسیختگی ایجاد شده در آزمایش B-2 را می‌توان در شکل ۸ مشاهده نمود.

جدول ۳ سرعت ورودی و خروجی و انرژی جذب شده نمونه‌های آزمایش بالستیک

کد نمونه <sup>(*)</sup>	نوع پرتابه	سرعت اولیه (m/s)	سرعت خروجی (m/s)	انرژی جذب شده (J)
B-2	تخت	۱۵۶	صفر (گیر کرد)	۱۱۳
B-3	تخت	۱۵۹	۱۳	۱۱۷
B-1	تخت	۱۶۴	۶۹	۱۰۳
B-5	تخت	۱۶۶	۱۰۶ (انحراف زیاد)	-----
B-4	تخت	۱۷۲	۱۰۵	۸۶
B-6	تخت	۱۷۸	۱۲۶	۷۴
H-4	نیم‌کروی	۱۳۸	صفر (عدم عبور)	۸۹
H-5	نیم‌کروی	۱۴۵	صفر (گیر کرد)	۹۸
H-3	نیم‌کروی	۱۵۰	خطای دستگاه	-----
H-2	نیم‌کروی	۱۵۷	۶۹	۹۲
H-6	نیم‌کروی	۱۶۱	۸۳	۸۸
H-1	نیم‌کروی	۱۶۴	۸۰	۹۵
Ct-3	مخروطی ۹۰°	۱۳۴	صفر (گیر کرد)	۸۳
Ct-4	مخروطی ۹۰°	۱۳۹	۱۹	۸۸
Ct-2	مخروطی ۹۰°	۱۴۵	۸۰	۶۸
Ct-1	مخروطی ۹۰°	۱۵۷	۸۵	۸۱
Ct-5	مخروطی ۹۰°	۱۶۵	۱۰۸	۷۲
Ot-10	اجیوال ۱/۵	۱۴۱	صفر	۹۲
Ot-9	اجیوال ۱/۵	۱۴۴	۲۴	۹۴
Ot-8	اجیوال ۱/۵	۱۴۵	خطای دستگاه	-----
Ot-2	اجیوال ۱/۵	۱۵۰	انحراف زیاد	-----
Ot-3	اجیوال ۱/۵	۱۵۳	انحراف زیاد	-----
Ot-7	اجیوال ۱/۵	۱۵۳	۸۳	۷۷
Ot-1	اجیوال ۱/۵	۱۵۶	۶۲	۹۵
Ot-4	اجیوال ۱/۵	۱۶۳	۹۸	۷۹
Ot-5	اجیوال ۱/۵	۱۷۱	۱۰۷	۸۳
O-8	اجیوال ۲/۵	۱۴۰	۸۹	۵۴
O-7	اجیوال ۲/۵	۱۴۵	۸۵	۶۴
O-2	اجیوال ۲/۵	۱۵۰	صفر (**)	-----
O-1	اجیوال ۲/۵	۱۵۳	خطای دستگاه	-----
O-5	اجیوال ۲/۵	۱۵۷	۹۷	۷۱
O-3	اجیوال ۲/۵	۱۶۴	۱۹ (**)	-----
O-4	اجیوال ۲/۵	۱۶۵	۱۱۹	۶۰
C-3	مخروطی ۳۷°	۱۲۰	صفر (عدم عبور)	۶۷
C-5	مخروطی ۳۷°	۱۲۶	صفر (عبور کرد)	۷۴
C-2	مخروطی ۳۷°	۱۳۷	خطای دستگاه	-----
C-4	مخروطی ۳۷°	۱۳۷	صفر (**)	-----
C-6	مخروطی ۳۷°	۱۳۷	۴۹	۷۶
C-7	مخروطی ۳۷°	۱۴۵	صفر (**)	-----
C-8	مخروطی ۳۷°	۱۵۰	خطای دستگاه	-----
C-9	مخروطی ۳۷°	۱۵۵	۸۵	۷۸
C-1	مخروطی ۳۷°	۱۶۹	۱۲۵	۶۰

(\*) در کد نمونه، حروف اول کد دماغه پرتابه (B: تخت، H: نیم‌کروی، Ct: مخروطی ۹۰°، Ot: اجیوال ۱/۵، O: اجیوال ۲/۵، C: مخروطی ۳۷°) و عدد دوم شماره آزمایش است. (\*\*\*) در این حالت انحراف پرتابه قبل از ورود به هدف روی داده است.

همچنین نمودار تنش-کرنش برشی ماده مرکب، حاصل از آزمایش برش، به صورت شکل ۶ ارائه می‌شود. خلاصه نتایج آزمایش‌های کشش و برش را می‌توان در جدول ۲ مشاهده نمود.

1- Plug  
2- Petal

با توجه به نمودار شکل ۷ و همچنین نحوه گیر کردن پرتابه با سرعت اولیه  $156\text{m/s}$  در هدف (شکل ۸)، سرعت حد بالستیک برای پرتابه با دماغه تخت، مقدار  $158\text{m/s}$  بدست می‌آید.

پرتابه پس از نفوذ به داخل هدف دچار انحراف می‌شود. علت این امر را می‌توان به ایده‌آل نبودن شرایط ضربه نسبت داد. امکان همگن نبودن هدف در محل ضربه، احتمال کاملاً عمود نبودن پرتابه هنگام ورود به هدف، امکان عدم برخورد پرتابه دقیقاً به وسط هدف، عدم رشد کاملاً یکسان پتال‌ها و موارد دیگر، می‌توانند عوامل اجتناب ناپذیری باشند که باعث انحراف پرتابه پس از نفوذ به هدف می‌گردند. بیش‌ترین انحراف پرتابه پس از عبور از هدف، در سرعت‌های نزدیک سرعت حد بالستیک دیده می‌شود، به طوری که برای پرتابه تخت، بیش‌ترین انحراف در سرعت حد بالستیک و به مقدار  $12$  درجه مشاهده شد. با افزایش سرعت اولیه، میزان انحراف پرتابه به سمت صفر میل می‌کند. به طوری که کمترین انحراف پرتابه در آزمایش با بیش‌ترین سرعت اولیه (آزمایش B-6) دیده می‌شود.

پرتابه تخت در صورت عدم انحراف، باعث ایجاد پلاگ برشی کامل در لایه‌های جلویی هدف و پتال با چهار گلبرگ در لایه‌های پشتی هدف می‌گردد. وجود انحراف در این حالت باعث ایجاد پلاگ برشی ناقص و همچنین رشد بیش‌تر یک پتال (در جهت انحراف) نسبت به سه پتال دیگر می‌گردد. در نتیجه انحراف پرتابه، باعث نفوذ راحت‌تر پرتابه به هدف می‌شود.

این موضوع در مورد آزمایش B-5 صادق است که انحراف پرتابه باعث بهبود عملکرد بالستیکی پرتابه شده است.

مساحتی از هدف که دچار لایه لایه شدگی می‌شود، با افزایش سرعت اولیه پرتابه کاهش پیدا می‌کند، ولی وجود انحراف در پرتابه مساحت این ناحیه را افزایش می‌دهد.

#### ۴-۲- پرتابه با دماغه نیم‌کروی

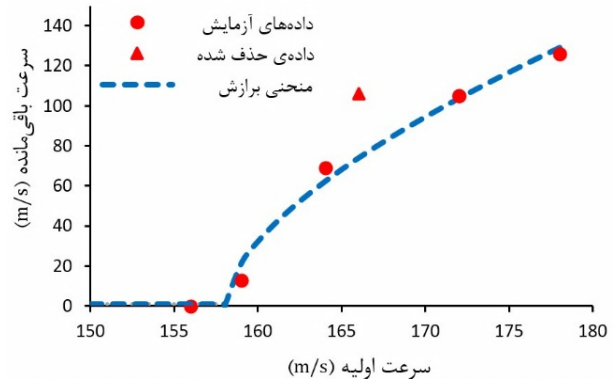
شکل ۹ منحنی بالستیک پرتابه با دماغه نیم‌کروی را نشان می‌دهد. سرعت حد بالستیک پرتابه با دماغه نیم‌کروی، مقدار  $145\text{m/s}$  بدست می‌آید. شکل ۱۰ رفتار پرتابه و هدف را در سرعت حد بالستیک (آزمایش H-5) نشان می‌دهد. مکانیزم گسیختگی هدف در این حالت، ایجاد پتال است. میزان انحراف پرتابه با دماغه نیم‌کروی، کمتر از پرتابه تخت است. به همین دلیل در این حالت چهار پتال متقارن در سطح پشتی هدف ایجاد می‌شود. با افزایش سرعت ضربه، مساحت پتال‌های تشکیل شده افزایش می‌یابد.

مساحت ناحیه لایه لایه شدگی هدف، با افزایش سرعت اولیه پرتابه کاهش پیدا می‌کند. اما سرعت کاهش این مساحت نسبت به پرتابه تخت کمتر است.

#### ۴-۳- پرتابه با دماغه مخروطی $90^\circ$

نمودار منحنی بالستیک برای این پرتابه در شکل ۱۱ رسم شده است. در این حالت، نتایج آزمایش، سرعت حد بالستیک را  $136\text{m/s}$  ارائه می‌کند. نحوه گسیختگی هدف، در سرعت حد بالستیک، برای پرتابه مخروطی  $90^\circ$  به صورت شکل ۱۲ است.

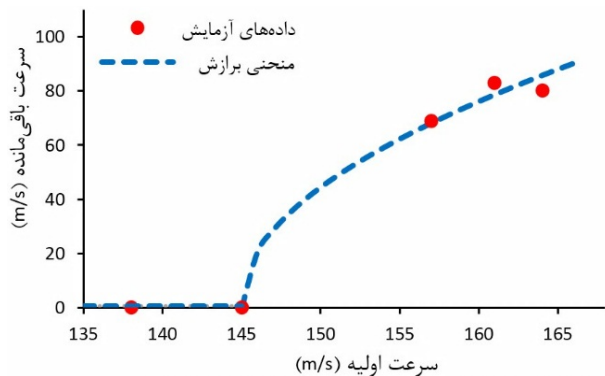
مکانیزم گسیختگی هدف در این شکل پرتابه، تشکیل پتال است، که با توجه به کم بودن میزان انحراف پرتابه در این حالت، چهار پتال متقارن و دارای مساحت مساوی تشکیل می‌گردد (همانند شکل ۱۲). مساحت پتال‌های تشکیل شده در این حالت بسیار کمتر از پتال‌های تشکیل شده توسط پرتابه با دماغه نیم‌کروی است.



شکل ۷ منحنی سرعت باقی‌مانده برحسب سرعت اولیه برای پرتابه تخت



شکل ۸ نفوذ پرتابه با دماغه تخت در هدف کامپوزیتی (آزمایش B-2)



شکل ۹ منحنی سرعت باقی‌مانده برحسب سرعت اولیه برای پرتابه نیم‌کروی



شکل ۱۰ نفوذ پرتابه با دماغه نیم‌کروی در هدف کامپوزیتی (آزمایش H-5)

جدول ۴ سرعت حد بالستیک، ضرایب منحنی برازش شده و دقت برازش برای پرتابه با دماغه‌های مختلف

نوع پرتابه	سرعت حد بالستیک (m/s)	a	p	r <sup>2</sup>
تخت	۱۵۸	۱/۹۸	۱/۶۹	۰/۹۹
نیم‌کروی	۱۴۵	۱/۰۵	۲/۱۱	۰/۹۸
مخروطی $90^\circ$	۱۳۶	۱/۱۳	۲/۰۶	۰/۹۲
مخروطی $37^\circ$	۱۲۶	۱/۵۱	۱/۴۴	۰/۹۹
اجیوال CRH=۱/۵	۱۴۲	۱/۲۳	۱/۸۷	۰/۹۴
اجیوال CRH=۲/۵	۱۲۰	۱/۱۱	۱/۹۰	۰/۹۶

در پرتابه با دماغه مخروطی  $90^\circ$ ، افزایش سرعت اولیه پرتابه، بر خلاف پرتابه با دماغه نیم‌کروی، باعث کاهش مساحت پلاگ‌های تشکیل شده می‌شود. علت این امر را می‌توان به جهت نیروی وارده بر پلاگ‌ها نسبت داد که باعث می‌شود انرژی جنبشی پلاگ‌ها در جهت  $45^\circ$  با راستای حرکت پرتابه‌ها باشد. مساحت ناحیه لایه لایه شده هدف برای پرتابه مخروطی  $90^\circ$  نسبت به حالت‌های قبل کمتر است و با افزایش سرعت اولیه پرتابه، مساحت این ناحیه کاهش می‌یابد.

#### ۴-۴- پرتابه با دماغه اجیوال $CRH=1/5$

در این حالت، انحراف پرتابه نسبت به پرتابه‌های قبلی بیشتر است. از این رو بیش از ۱۰ آزمایش برای تعیین رفتار بالستیکی پرتابه اجیوال  $CRH=1/5$  انجام شد. شکل ۱۳ نتایج آزمایش‌ها را به صورت نمودار سرعت باقی‌مانده بر حسب سرعت اولیه نشان می‌دهد. پرتابه در آزمایش Ot-10 با سرعت خیلی کمی از هدف خارج شد. در نتیجه با توجه به نتایج آزمایش‌ها و همچنین تخمین منحنی بالستیک (شکل ۱۳)، سرعت حد بالستیک برای این حالت مقدار  $142\text{ m/s}$  بدست می‌آید. شکل ۱۴ سطح پشتی هدف را در این آزمایش نشان می‌دهد.

در این حالت نیز پرتابه پس از عبور از هدف، چهار پتال ایجاد می‌کند که با افزایش سرعت اولیه پرتابه، مساحت پتال‌های ایجاد شده کاهش پیدا می‌کند. انحراف پرتابه در این حالت هم باعث افزایش مساحت پتال می‌گردد. این موضوع به وضوح در آزمایش‌های Ot-2 و Ot-3 مشاهده شد. انحراف پرتابه اجیوال  $CRH=1/5$ ، بر خلاف پرتابه تخت، باعث افت عملکرد بالستیکی پرتابه می‌شود.

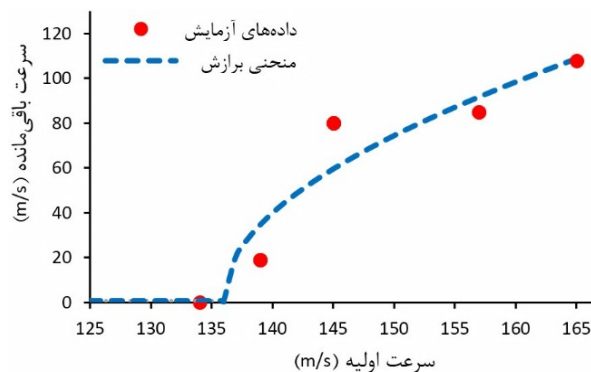
در صورت کم بودن انحراف پرتابه، این پرتابه ناحیه لایه لایه شدگی کوچکی در هدف ایجاد می‌کند که با افزایش سرعت اولیه پرتابه، مساحت این ناحیه کاهش می‌یابد.

#### ۴-۵- پرتابه مخروطی $37^\circ$

هنگامی که تیزی دماغه پرتابه (به عبارت دیگر طول دماغه پرتابه) از یک حد بیشتر می‌شود، انحراف پرتابه قبل از ورود به هدف، در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک، به شدت افزایش می‌یابد. ایده‌آل نبودن شرایط ضربه، مانند عدم برخورد عمود پرتابه (حتی وجود زاویه برخورد خیلی کم)، وجود زبری هدف در سطح جلویی، احتمال ناهمگنی هدف در سطح برخورد و موارد دیگر، به همراه تیزی زیاد نوک دماغه پرتابه باعث می‌شوند که پرتابه قبل از ورود به سطح جلویی دچار انحراف شده و در سرعت‌های بالاتر از حد بالستیک از هدف عبور نکنند. اوج انحراف پرتابه قبل از ورود به هدف در پرتابه با دماغه مخروطی  $37^\circ$  مشاهده می‌شود که دارای تیزترین دماغه است. آزمایش‌هایی که در آن‌ها پرتابه قبل از ورود به هدف دچار انحراف شده است، با علامت \* در جدول ۳ مشخص شده است. اثر تیزی دماغه پرتابه بر لایه‌های جلویی هدف که بر اثر انحراف پرتابه قبل از ورود به هدف روی داده است، در شکل ۱۵ مشخص است.

از مجموع بیش از ۱۰ آزمایش برای پرتابه با دماغه مخروطی  $37^\circ$ ، چهار آزمایش بدون انحراف اولیه و خطای دستگاه از هدف عبور کردند. منحنی بالستیک این پرتابه در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

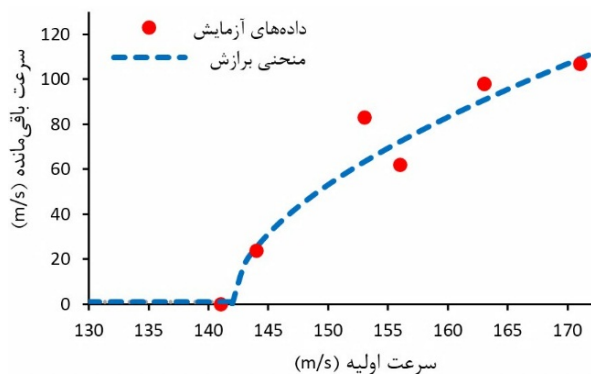
با افزایش سرعت اولیه پرتابه، در سرعت‌های بالا و دور از منطقه حد بالستیک، پدیده انحراف پرتابه قبل از ورود به هدف، از بین می‌رود و عملکرد پرتابه به حالت ایده‌آل نزدیک می‌شود.



شکل ۱۱ منحنی سرعت باقی‌مانده بر حسب سرعت اولیه برای پرتابه مخروطی  $90^\circ$



شکل ۱۲ نفوذ پرتابه با دماغه مخروطی  $90^\circ$  در هدف کامپوزیتی (آزمایش Ot-3)



شکل ۱۳ منحنی سرعت باقی‌مانده بر حسب سرعت اولیه برای پرتابه اجیوال  $1/5$



شکل ۱۴ سطح پشتی هدف در آزمایش Ot-10



شکل ۱۵ اثر کشیده شدن تیزی پرتابه بر لایه‌های جلویی هدف بر اثر انحراف پرتابه قبل از ورود به هدف (آزمایش C-7)

با توجه به تخمین منحنی بالستیک و مشاهدات آزمایش‌ها، سرعت حد بالستیک مقدار  $126\text{m/s}$  بدست می‌آید. گسیختگی هدف از نوع تشکیل پتال است. به دلیل انحراف پرتابه در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک، در صورت عبور پرتابه، یکی از پتال‌ها (در جهت انحراف) دارای مساحت بیشتری خواهد بود. ناحیه لایه لایه شدگی در این حالت خیلی کوچک است.

#### ۴-۶- پرتابه با دماغه اجیوال $CRH=2/5$

پدیده انحراف پرتابه قبل از ورود به هدف، برای این پرتابه نیز اتفاق می‌افتد، که در آزمایش‌های 0-2 و 0-3 مشخص است. از میان حدود 10 آزمایش، نتیجه چهار آزمایش صحیح استخراج شد. شکل 17 منحنی سرعت باقی‌مانده بر حسب سرعت اولیه را برای پرتابه با دماغه اجیوال  $CRH=2/5$  نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه آزمایش‌های با سرعت اولیه نزدیک حد بالستیک با خطای زیادی همراه هستند، در نتیجه نمی‌توان سرعت حد بالستیک را با آزمایش تعیین نمود. با توجه به نتایج آزمایش در سرعت‌های بالا، رفتار سایر پرتابه‌ها و منحنی بالستیک پرتابه، سرعت حد بالستیک حدود  $120\text{m/s}$  تخمین زده می‌شود.

مساحت پتال‌های ایجاد شده توسط پرتابه اجیوال  $CRH=2/5$  نسبت به پرتابه مخروطی  $37^\circ$  کوچکتر است.

#### ۴-۷- مقایسه عملکرد پرتابه‌ها با دماغه‌های مختلف

##### ۴-۷-۱- سرعت باقی‌مانده

شکل 18 منحنی بالستیک پرتابه‌ها با دماغه‌های مختلف را در کنار یکدیگر نشان می‌دهد.

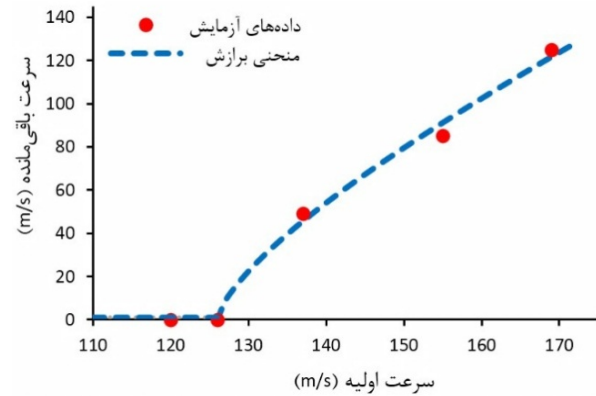
همان‌طور که از شکل 18 مشخص است، بیشترین اختلاف مابین عملکرد پرتابه‌ها با دماغه‌های مختلف در سرعت حد بالستیک مشاهده می‌شود. در این محدوده سرعت اولیه، بهترین عملکرد بالستیکی را پرتابه با دماغه اجیوال  $CRH=2/5$  و بدترین عملکرد بالستیکی را پرتابه با دماغه تخت ارائه می‌کند. ترتیب بهترین عملکرد بالستیکی برای پرتابه‌ها با دماغه‌های مختلف بدین صورت است: 1- پرتابه اجیوال با شعاع کالیبر  $2/5$ ، 2- پرتابه مخروطی با زاویه دماغه  $37^\circ$  درجه، 3- پرتابه مخروطی با زاویه دماغه  $90^\circ$  درجه، 4- پرتابه اجیوال با شعاع کالیبر  $1/5$ ، 5- پرتابه نیم‌کروی و 6- پرتابه تخت.

با افزایش سرعت اولیه پرتابه، اختلاف مابین سرعت باقی‌مانده پرتابه‌های مختلف کمتر می‌شود و پرتابه‌ها در سرعت‌های دور از ناحیه حد بالستیک، عملکرد تقریباً مشابهی را ارائه می‌کنند. رفتار پرتابه تخت، در سرعت‌های بالا، با پرتابه‌های دیگر متفاوت است، که این تمایز می‌تواند به دلیل نوع گسیختگی متفاوت هدف در برخورد با پرتابه تخت باشد. این پرتابه در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک بدترین عملکرد را ارائه می‌کند. در حالی که با افزایش سرعت اولیه پرتابه، از یک سرعت (حدود  $180\text{m/s}$ ) به بعد، عملکرد بالستیکی پرتابه تخت نسبت به پرتابه‌های دیگر بهتر می‌شود.

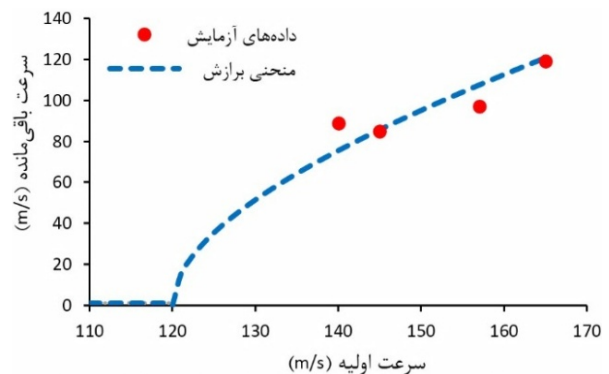
پرتابه‌های با دماغه تیزتر، در صورتی که شرایط ضربه (جهت برخورد، شرایط هدف و ...) ایده‌آل باشد، بهترین عملکرد بالستیکی را ارائه می‌کنند. در حالی که اگر شرایط از حالت ایده‌آل فاصله بگیرد، این نوع پرتابه‌ها به دلیل امکان انحراف در هدف و یا کمناش از سطح هدف، ضعیف‌ترین عملکرد را در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک از خود نشان می‌دهند.

##### ۴-۷-۲- انرژی جذب شده

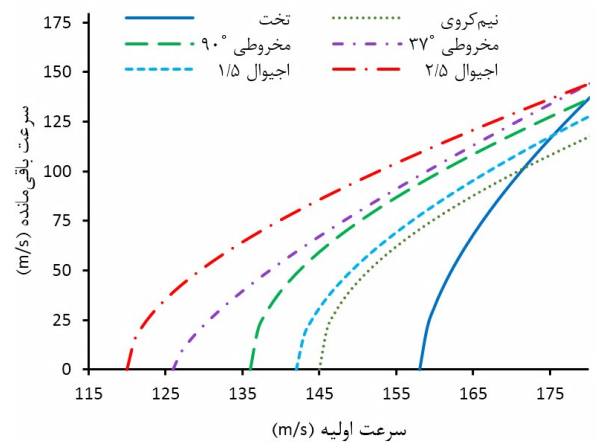
شکل 19 انرژی جذب شده بر حسب سرعت اولیه را برای پرتابه با شکل دماغه‌های مختلف نشان می‌دهد.



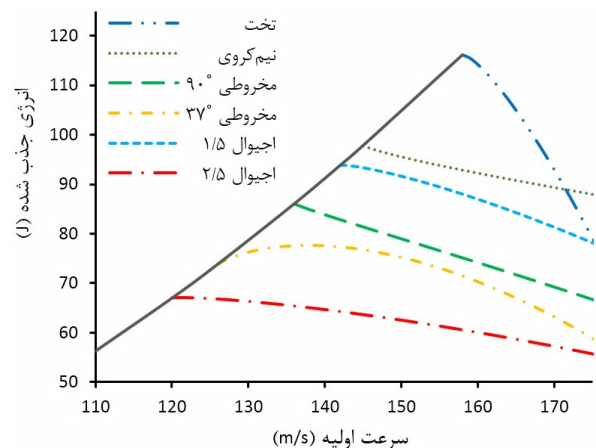
شکل 16 منحنی سرعت باقی‌مانده بر حسب سرعت اولیه برای پرتابه مخروطی  $37^\circ$



شکل 17 منحنی سرعت باقی‌مانده بر حسب سرعت اولیه برای پرتابه اجیوال  $2/5$



شکل 18 منحنی سرعت باقی‌مانده بر حسب سرعت اولیه برای پرتابه‌های مختلف



شکل 19 منحنی انرژی جذب شده بر حسب سرعت اولیه برای پرتابه‌های مختلف



### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر شکل دماغه و همچنین سرعت اولیه پرتابه‌های متقارن محوری بر عملکرد بالستیکی اهداف کامپوزیتی، به صورت تجربی، مورد مطالعه قرار گرفت. شکل دماغه‌های تخت، مخروطی، نیم‌کروی و اجیوال، تأثیر تغییر تیزی دماغه، تغییرات جذب انرژی، بررسی ناحیه لایه لایه شدگی و غیره، از جمله مواردی هستند که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند.

بررسی نتایج نشان دادند که بیش‌ترین اختلاف مابین عملکرد پرتابه‌ها با دماغه‌های مختلف در سرعت حد بالستیک مشاهده می‌شود. در این محدوده سرعت اولیه، بهترین عملکرد بالستیکی را پرتابه با دماغه اجیوال  $CRH=2/5$  و بدترین عملکرد بالستیکی را پرتابه با دماغه تخت ارائه می‌کند. در این حالت سرعت حد بالستیک پرتابه با دماغه تخت، حدود ۳۲٪ بیشتر از پرتابه با دماغه اجیوال  $CRH=2/5$  است.

ترتیب پرتابه‌ها بر اساس بهترین عملکرد بالستیکی عبارتند از: ۱- پرتابه اجیوال با شعاع کالیبر ۲/۵، ۲- پرتابه مخروطی با زاویه دماغه ۳۷ درجه، ۳- پرتابه مخروطی با زاویه دماغه ۹۰ درجه، ۴- پرتابه اجیوال با شعاع کالیبر ۱/۵، ۵- پرتابه نیم‌کروی و ۶- پرتابه تخت.

با افزایش سرعت اولیه پرتابه، اختلاف مابین سرعت باقی‌مانده پرتابه‌های مختلف کمتر می‌شود. به دلیل گسیختگی متفاوت هدف در برخورد با پرتابه تخت، رفتار این پرتابه، در سرعت‌های بالا، با پرتابه‌های دیگر متفاوت است. هرچه تیزی دماغه پرتابه بیشتر باشد، به شرط عدم انحراف پرتابه، مساحت ناحیه لایه لایه شدگی کمتر می‌شود. انحراف پرتابه مساحت این ناحیه را بشدت افزایش می‌دهد.

هنگامی که تیزی دماغه پرتابه (به عبارت دیگر طول دماغه پرتابه) از یک حد بیشتر می‌شود، انحراف پرتابه قبل از ورود به هدف، در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک، به شدت افزایش می‌یابد. به همین دلیل با وجود نفوذپذیری بیشتر این پرتابه‌ها، افزایش امکان انحراف پرتابه در حین نفوذ و یا کمانش پرتابه از سطح هدف، کارایی آن‌ها را بسیار کم می‌کند.

### ۶- مراجع

- [1] M. Iremonger, A. Went, Ballistic impact of fibre composite armours by fragment-simulating projectiles, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 27, No. 7, pp. 575-581, 1996.
- [2] R. A. W. Mines, A. M. Roach, N. Jones, High velocity perforation behaviour of polymer composite laminates, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 22, No. 6, pp. 561-588, 1999.
- [3] H. Wen, Predicting the penetration and perforation of FRP laminates struck normally by projectiles with different nose shapes, *Composite Structures*, Vol. 49, No. 3, pp. 321-329, 2000.
- [4] C. Ulven, U. Vaidya, M. Hosur, Effect of projectile shape during ballistic perforation of VARTM carbon/epoxy composite panels, *Composite Structures*, Vol. 61, No. 1, pp. 143-150, 2003.
- [5] T. Mitrevski, I. Marshall, R. Thomson, R. Jones, B. Whittingham, The effect of impactor shape on the impact response of composite laminates, *Composite Structures*, Vol. 67, No. 2, pp. 139-148, 2005.
- [6] T. Mitrevski, I. Marshall, R. Thomson, R. Jones, Low-velocity impacts on preloaded GFRP specimens with various impactor shapes, *Composite Structures*, Vol. 76, No. 3, pp. 209-217, 2006.
- [7] N. K. Naik, P. Shrirao, B. C. K. Reddy, Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 9, pp. 1521-1552, 2006.
- [8] T. He, H. Wen, Y. Qin, Finite element analysis to predict penetration and perforation of thick FRP laminates struck by projectiles, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, No. 1, pp. 27-36, 2008.
- [9] M. H. Pol, G. H. Liaghat, M. Sedighi, Analytical modeling of perforation of projectiles into glass epoxy composites, *Modares Mechanical Engineering*, 2012. (In Persian)

همان‌طور که از شکل ۱۸ مشخص است با افزایش سرعت انرژی جذب شده، برای پرتابه‌های مختلف، کاهش پیدا می‌کند. نرخ کاهش جذب انرژی برای پرتابه تخت، نسبت به سایر پرتابه‌ها، بیشتر است. پرتابه تخت در سرعت‌های نزدیک حد بالستیک بیش‌ترین جذب انرژی را نشان می‌دهد. اما در سرعت‌های بالا، میزان جذب انرژی برای پرتابه تخت، از سایر پرتابه‌ها کمتر می‌شود.

### ۴-۷-۳- ناحیه لایه لایه شدگی هدف

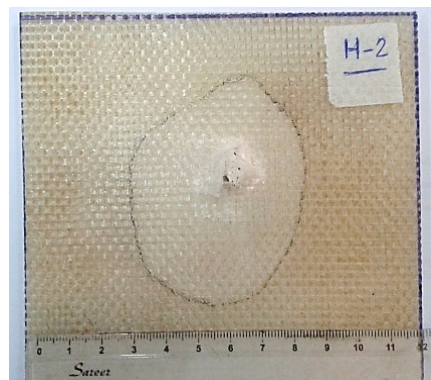
ناحیه لایه لایه شدگی در هدف کامپوزیتی که تحت ضربه پرتابه قرار گرفته، در شکل ۲۰ مشخص است. برای مقایسه ناحیه لایه لایه شدگی هدف که توسط پرتابه‌های مختلف ایجاد می‌شود، مساحت این ناحیه در آزمایش‌های دارای سرعت اولیه یکسان، مورد مقایسه قرار داده می‌شود. سرعت اولیه حدود  $156\text{m/s}$  و  $165\text{m/s}$  در تمامی پرتابه‌ها مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و دارای قابلیت مقایسه هستند. محاسبه مساحت ناحیه لایه لایه شدگی توسط نرم‌افزار اتوکد انجام شد. جدول ۵ مساحت این ناحیه را در دو سرعت مذکور، برای پرتابه‌های مختلف، نشان می‌دهد.

همان‌گونه که نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد پرتابه تخت بیش‌ترین ناحیه لایه لایه شدگی را در هدف ایجاد می‌کند. هرچه تیزی دماغه پرتابه بیشتر باشد، به شرط عدم انحراف پرتابه، مساحت ناحیه لایه لایه شدگی کمتر می‌شود. انحراف پرتابه مساحت این ناحیه را بشدت افزایش می‌دهد. نمونه این حالت در آزمایش 0-1 رخ می‌دهد که در جدول ۵ با علامت \* مشخص شده است. بیش‌ترین مساحت ناحیه لایه لایه شدگی هدف، معمولاً در سرعت حد بالستیک مشاهده می‌شود. با افزایش سرعت و دور شدن از منطقه حد بالستیک، مساحت این ناحیه کاهش می‌یابد. اثر افزایش سرعت بر ناحیه لایه لایه شدگی نیز در جدول ۵ مشخص است.

جدول ۵ مساحت ناحیه لایه لایه شدگی در دو سرعت اولیه برای پرتابه‌های مختلف

شکل دماغه پرتابه	سرعت اولیه $156\text{m/s}$		سرعت اولیه $165\text{m/s}$	
	کد آزمایش	مساحت ناحیه لایه لایه شدگی ( $\text{cm}^2$ )	کد آزمایش	مساحت ناحیه لایه لایه شدگی ( $\text{cm}^2$ )
تخت	B-2	۳۳/۸	B-1	۳۰/۵
نیم‌کروی	H-2	۲۸/۸	H-1	۲۴/۹
مخروطی $90^\circ$	Ct-1	۳۳/۷	Ct-5	۲۵/۲
مخروطی $37^\circ$	C-9	۶/۲	C-1	۳/۶
اجیوال $CRH=1/5$	Ot-1	۲۴/۶	Ot-4	۱۳/۴
اجیوال $CRH=2/5$	O-1	۳۵/۸ <sup>(*)</sup>	O-4	۸/۵

(\*) در این حالت انحراف پرتابه زیاد بوده است



شکل ۲۰ ناحیه لایه لایه شدگی هدف بر اثر نفوذ پرتابه

- [12] J. B. Jordan, C. J. Naito, An experimental investigation of the effect of nose shape on fragments penetrating GFRP, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 63, No. 0, pp. 63-71, 2014.
- [13] R. F. Recht, T. W. Ipson, Ballistic Perforation Dynamics, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 30, No. 3, pp. 384-390, 1963.
- [10] A. Khodadadi, G. H. Liaghat, M. Akbari, M. Tahmasebi, Numerical and experimental analysis of penetration into kevlar fabrics and investigation of the effective factors on the ballistic performance, *Modares Mechanical Engineering*, 2013. (In Persian)
- [11] B. M. Icten, B. G. Kiral, M. E. Deniz, Impactor diameter effect on low velocity impact response of woven glass epoxy composite plates, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 50, No. 0, pp. 325-332, 2013.